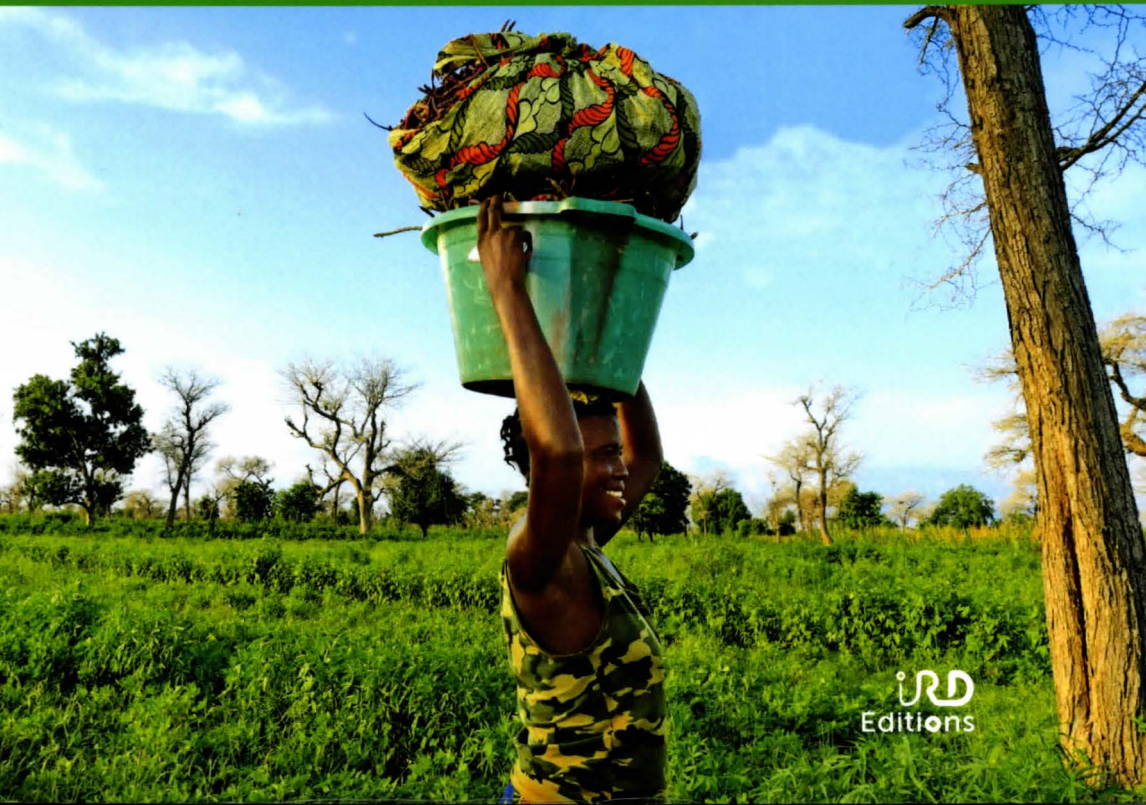


Sous la direction de

B. Sultan, A. Y. Bossa,
S. Salack, M. Sanon

Risques climatiques et agriculture en Afrique de l'Ouest



Sélection du sorgho pour une intensification durable au Mali

Apports de la modélisation des cultures

*Mamoutou KOURESSY, Salifou SISSOKO, Mohamed L. TÉKÉTÉ,
Sékouba SANOGO, Sayon KAMISSOKO, Mohamed DOUMBIA,
Aliou SISSOKO, Korotimi THÉRA, Michael DINGKHUN, Aboubakary S. KONÉ,
Maïmouna OUATTARA, Michel VAKSMANN, Niaba TÉMÉ*

Introduction

La forte croissance démographique du Mali entraîne un développement rapide de la demande alimentaire des populations rurales et urbaines. Jusqu'à présent, le renforcement de la production céréalière résulte principalement de l'expansion des surfaces cultivées. Toutefois, la saturation progressive des zones rurales limite cette évolution, et une augmentation durable de la productivité des systèmes de cultures sera nécessaire.

Le changement climatique affectera probablement la répartition des pluies au Mali. Les grandes sécheresses des années 1970 et 1980 au Sahel ont provoqué une diminution significative des précipitations, mais leurs effets sur la structure de la saison des pluies ont été faibles (LE BARBÉ et LEBEL, 1997 ; LODOUN *et al.*, 2013 ; TRAORÉ *et al.*, 2000). Les modèles climatiques ne permettent pas de prédire la distribution prochaine des précipitations africaines, mais une augmentation de la variabilité du climat et une succession de périodes de sécheresse et d'inondation sont attendues (THORNTON et GERBER, 2010 ; VISCHEL *et al.*, 2015). Les effets du changement climatique sur la production agricole sont difficiles à analyser car ils s'accompagnent de changements socio-économiques importants. Ainsi, malgré les sécheresses récurrentes, la production céréalière augmente au Mali, montrant la capacité de l'agriculture africaine à atteindre l'autosuffisance alimentaire grâce à l'intensification de la production agricole (KOURESSY *et al.*, 2019 ; VAN ITTERSUM *et al.*, 2016).

Les variétés locales de sorgho sont particulièrement bien adaptées aux stress biotiques et abiotiques mais possèdent un faible potentiel de rendement. La stabilité des

variétés locales réside en grande partie dans leur sensibilité à la photopériode qui provoque la synchronisation de la date de floraison avec la fin de la saison des pluies quelle que soit la date de semis. Les variétés adaptées fleurissent dans la période de 20 jours qui précède la fin de la saison des pluies (KOURESSY *et al.*, 2008 b ; TRAORÉ *et al.*, 2007). Cette condition assure un équilibre entre la satisfaction des besoins en eau et l'évitement de nombreuses contraintes biotiques. Le grain des variétés trop précoces est attaqué par les oiseaux et altéré par les moisissures et les insectes, tandis que les variétés tardives épuisent l'humidité du sol avant la fin du remplissage des grains.

Dans le sillon de la révolution verte, la sensibilité à la photopériode a été éliminée par les programmes de sélection afin de développer des variétés précoces ayant une adaptation géographique plus large (BONNEUIL et THOMAS, 2009). Cependant, le taux d'adoption des nouvelles variétés est faible (VOM BROCKE *et al.*, 2008), les agriculteurs africains cultivent encore essentiellement des variétés locales sensibles à la photopériode qui arrivent à maturité plus tard que les variétés modernes (KOURESSY *et al.*, 2008 a). De nos jours, le développement de variétés sensibles à la photopériode à haut rendement adaptées au climat soudano-sahélien est devenu une priorité des programmes de sélection des céréales des zones arides d'Afrique de l'Ouest (HAUSSMANN *et al.*, 2012 ; KOURESSY *et al.*, 1998 a ; VAKSMANN *et al.*, 2008). En outre, la sensibilité à la photopériode a récemment attiré l'attention des sélectionneurs pour augmenter le rendement de la biomasse et favoriser la production de biocarburants (OLSON *et al.*, 2012).

L'objectif de ce travail est d'identifier les contraintes génétiques à la mise en place d'une intensification durable du sorgho à travers la comparaison de deux variétés modernes et de trois variétés locales du Mali.

Matériel et méthodes

Zone d'étude

Les expérimentations sur la phénologie et la productivité ont été effectuées au Mali à la station de recherche de Sotuba (12° 39' N, 7° 56' W), située en zone de savane soudanienne. La pluviométrie de ce site suit une distribution mono-modale en été (de mai à novembre) avec une moyenne annuelle de 880 mm. La température moyenne mensuelle est de 33,7 °C pour la maximale et de 21,0 °C pour la minimale.

Matériel végétal

Pour étudier les solutions endogènes d'adaptation aux risques climatiques au Mali, une prospection des variétés de sorgho a été réalisée dans le village de Béguéné (12° 50' N, 5° 50' W). Trois variétés locales issues de cette prospection ont été choisies pour cette étude : *Gnognéfing*, *Télimani* et *N'Diécoura*. Elles sont de type botanique Guinéense et de grande taille (de 3 à 4,5 m). Deux variétés améliorées (*Grinkan* et *Wassalen*) ont été choisies pour représenter le matériel moderne développé par

l'Institut d'économie rurale du Mali. Les variétés améliorées sont de type botanique Caudatum/Guinéa. La variété Grinkan (02-SB-F4DT-275) a été homologuée en 2007. La variété Wassalen (C2_075-15) provient d'un programme de sélection assistée par les marqueurs moléculaires et a été homologuée en 2018. Les deux variétés améliorées sont de taille moyenne (de 1,5 à 2,5 m). Le gène de nanisme *dw3* a été principalement utilisé pour réduire la taille des variétés Grinkan et Wassalen (données non publiées).

Étude du développement

Un essai comportant trois dates de semis a permis d'étudier la phénologie des variétés sous différentes conditions de photopériode. Cet essai a été répété en 2017 et 2018. Le dispositif était constitué d'un split-plot à deux répétitions. Le facteur principal comportait les trois dates de semis (10 juin, 10 juillet et 10 septembre) et le facteur secondaire comportait les cinq variétés. Le stade phénologique suivi était la date d'apparition de la ligule de la dernière feuille ou feuille drapeau.

Étude de la croissance

Un essai comportant deux dates de semis a été mis en place à la station de Sotuba. Le dispositif expérimental était un split-plot à trois répétitions avec deux dates de semis comme facteur principal et cinq variétés comme facteur secondaire. Les dates de semis ont été les 12 juin et 10 juillet en 2017, et les 8 juin et 9 juillet en 2018. Ces dates encadrent la période normale de semis des paysans dans cette zone climatique. La densité vulgarisée de 53 333 plantes/ha a été utilisée.

La biomasse sèche des organes aériens (feuilles, tiges et panicules) a été mesurée à partir de prélèvements réalisés à cinq dates au cours du cycle : 15 et 30 jours après la levée ; à l'initiation paniculaire ; à la floraison et à la maturité du grain. Les organes aériens ont été partagés en trois fractions : d'abord les limbes des feuilles, puis les tiges et gaines des feuilles, et enfin les panicules. La biomasse sèche de chaque fraction a été évaluée après séchage à l'étuve (80 °C). Le rendement grain a été mesuré à maturité.

La surface spécifique des feuilles (SLA) a été mesurée régulièrement en divisant la surface des dernières feuilles ligulées par leur biomasse sèche. La SLA s'exprime en cm^2/g et permet de calculer l'indice de surface foliaire (LAI) en déduisant la surface des limbes à partir de leur poids de matière sèche. Les analyses de la variance ont été réalisées sur les biomasses mesurées à la maturité totale pour le grain et les tiges, et sur la valeur maximale de la biomasse des feuilles. Le LAI a été utilisé pour décrire la dynamique de mise en place de la surface foliaire.

Modélisation du développement

La réponse à la photopériode a été déterminée à partir du coefficient de photopériodisme K_p , qui correspond à la réduction de la durée allant du semis à l'apparition de la feuille drapeau (SFD) entre les semis de juin et juillet divisé par l'écart, en jours, entre les deux dates de semis (CLERGET *et al.*, 2007). Ce coefficient est utile pour comparer la sensibilité à la photopériode de variétés cultivées dans les mêmes

conditions, mais permet difficilement de prévoir le comportement de ces variétés lorsque l'environnement change (date de semis ou latitude). Pour prédire le comportement des variétés en interaction avec l'environnement, il est préférable d'utiliser des modèles de développement intégrant les effets propres de la température et de la photopériode (DINGKUHN *et al.*, 2008 ; FOLLIARD *et al.*, 2004 ; KOURESSY *et al.*, 2008 a). La réponse à la photopériode a été décrite à l'aide du modèle Samara, qui considère que l'initiation florale se produit lorsque la photopériode descend en dessous d'un seuil de photopériode critique qui varie avec l'âge de la plante (DINGKUHN *et al.*, 2008). Le programme Ridev (DINGKUHN *et al.*, 2017), initialement rédigé pour le riz et récemment élargi au sorgho, a été utilisé pour calculer ces paramètres à partir des résultats obtenus sur trois dates de semis. Les températures cardinales utilisées ont été 11 °C pour la température de base, 34 °C pour la température optimale et 44 °C pour la température maximale (ABDULAI *et al.*, 2012). Le temps thermique nécessaire à l'initiation de la panicule est calculé en considérant que l'initiation se produit en moyenne 22 jours avant l'émission de la feuille drapeau.

En raison de divergences entre nos mesures et les prédictions du modèle Samara, nous en avons limité l'utilisation à la prédiction du développement. Des ajustements du modèle seront nécessaires pour mieux décrire la dynamique de mise en place des entre-nœuds sur la tige.

Délimitation des zones de culture optimales

La méthode utilisée permet d'identifier les zones pour lesquelles une variété peut être semée en minimisant les risques biotiques et abiotiques. Les informations sur la sensibilité à la photopériode, sur la variabilité climatique et les pratiques des agriculteurs sont combinées selon la méthode décrite par SISSOKO *et al.* (2018). Pour chaque station pluviométrique du Mali, le début et la fin de la saison des pluies ont été établis en utilisant un modèle simplifié de bilan hydrique (TRAORÉ *et al.*, 2000). La date de floraison a été prédite en utilisant le modèle Samara (DINGKUHN *et al.*, 2008). La différence en jours entre la date d'épiaison prédite et la fin de la saison des pluies donne un indice d'adaptation qui est calculé pour chaque variété sur les différents postes pluviométriques du Mali. Un système d'information géographique (Surfer® Golden Software) a été utilisé pour délimiter les zones pour lesquelles chaque variété épie dans les 20 jours précédant la fin moyenne de la saison des pluies (KOURESSY *et al.*, 2008 b). Les simulations ont été réalisées pour un semis dès l'installation de la saison des pluies et pour un semis effectué un mois plus tard. Cet étalement des semis correspond aux pratiques observées dans les champs des paysans.

Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont porté sur les biomasses tiges et grains à la récolte et sur la biomasse maximale des feuilles. L'analyse de la variance a été réalisée à partir du regroupement des essais de 2017 et 2018 comme indiqué par GOMEZ et GOMEZ (1984) pour un dispositif en split-plot. Le modèle utilisé pour le regroupement des essais était :

$$Y_{ghij} = \mu + E_g + R_{h(g)} + A_i + (AE)_{ig} + \delta_{h(g)i} + B_j + (BE)_{jg} + (AB)_{ij} + (ABE)_{ijg} + \varepsilon_{h(g)ij}$$

où :

- Y_{ghij} est la mesure pour le j^{em} niveau du facteur A (semis en traitement principal) et j^{em} niveau du facteur B (variété en sous-bloc) pour le h^{em} bloc dans l'environnement g
- μ est la moyenne générale
- E_g est l'effet du g^{em} environnement (année)
- $R_{h(g)}$ est l'effet du bloc h dans l'environnement g
- A_i est l'effet du traitement A (semis)
- $(AE)_{ig}$ est l'effet de l'interaction entre le traitement A et l'environnement E
- $\delta_{h(g)i}$ est l'erreur pour le traitement A
- B_j est l'effet du traitement B (variété)
- $(BE)_j$ est l'interaction entre le traitement B et l'environnement
- $(AB)_{ij}$ est l'interaction entre les facteurs A et B
- $(ABE)_{ijg}$ est l'interaction entre les facteurs A, B et l'environnement
- $\epsilon_{h(g)ij}$ est l'erreur pour le facteur B.

Résultats

Étude du développement

La durée semis-feuille drapeau (SFD) de toutes les variétés varie fortement avec la date de semis (fig. 1). Entre les deux premiers semis, pour un décalage de semis de 30 jours (10 juin au 10 juillet), la durée SFD des variétés locales N'Diécoura et

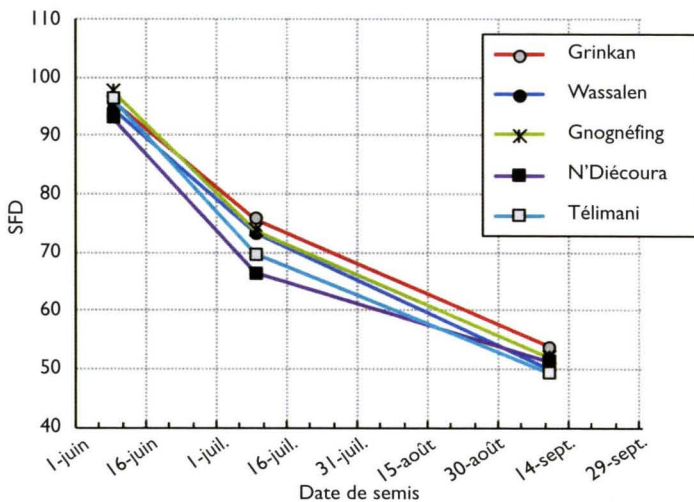


Figure 1.

Durée semis-feuille drapeau (SFD en jours) en fonction de la date de semis des cinq variétés étudiées à Sotuba en 2017 et 2018.

Télimani se raccourcit de 26 jours, ce qui correspond à un coefficient de photopériodisme K_p de 0,9. Les deux variétés améliorées (Grinkan et Wassalen) et la variété locale Gnognéning sont légèrement moins sensibles à la photopériode, SFD se raccourcit en moyenne de 20 jours ($K_p = 0,7$). Entre le second et le troisième semis (10 juillet-10 septembre), SFD est réduit en moyenne de 20 jours. Ces résultats ont permis de calculer les paramètres phénologiques du modèle Samara (BVP, PPsens et PPcrit) à l'aide de l'outil Ridev.

Délimitation des zones de culture optimales

Les zones d'adaptation des 5 variétés étudiées sont présentées en figure 2. La zone d'adaptation correspondant à un semis précoce est en bleu, tandis que la zone d'adaptation correspondant à un semis tardif est en rouge. Le retard de semis entraîne un déplacement de la zone d'adaptation vers le sud. En raison de la sensibilité à la photopériode, il existe un chevauchement des deux zones (en violet) qui correspond à la zone de culture optimale dans laquelle la culture de la variété est possible quelle que soit la date de semis.

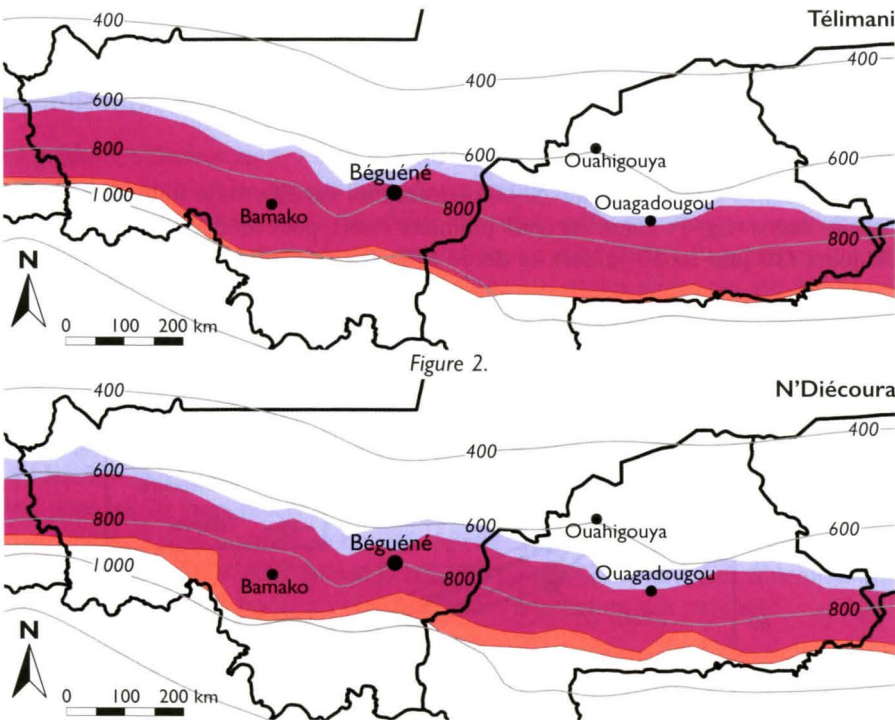


Figure 2.
Délimitation des zones optimales de culture pour les 5 variétés étudiées en 2017 et 2018.
La zone d'adaptation est en bleu pour un semis précoce
et en rouge pour un semis tardif.
La zone de culture optimale (le chevauchement des deux zones) apparaît en violet.
Les isohyètes sont indiquées pour la période normale (1981-2010).

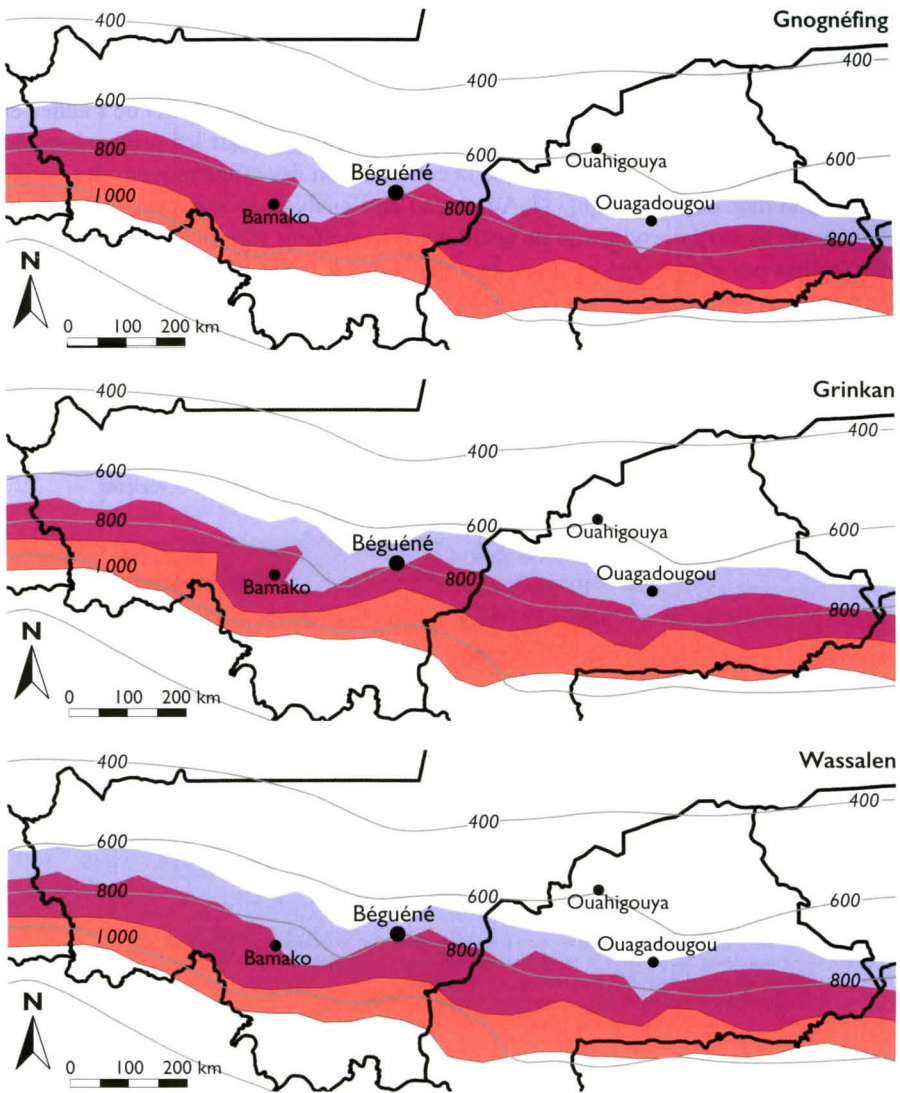


Figure 2 (suite).

Les variétés locales N'Diécoura et Télamani possèdent des zones optimales incluant ou proche de Bégoué leur village d'origine. Les zones d'adaptation des deux variétés améliorées (Grinkan et Wassalen) et de la variété locale Gnognéning se situent légèrement plus au sud. En raison de leur plus forte sensibilité à la photopériode, les zones optimales de culture des variétés locales Télamani et N'Diécoura sont plus larges car leurs dates de floraison sont très peu affectées par la date de semis, et le chevauchement des deux zones est presque total. En conséquence, ces variétés disposent de zones optimales de culture plus larges que les deux variétés améliorées.

Productivité

BIOMASSE VÉGÉTATIVE

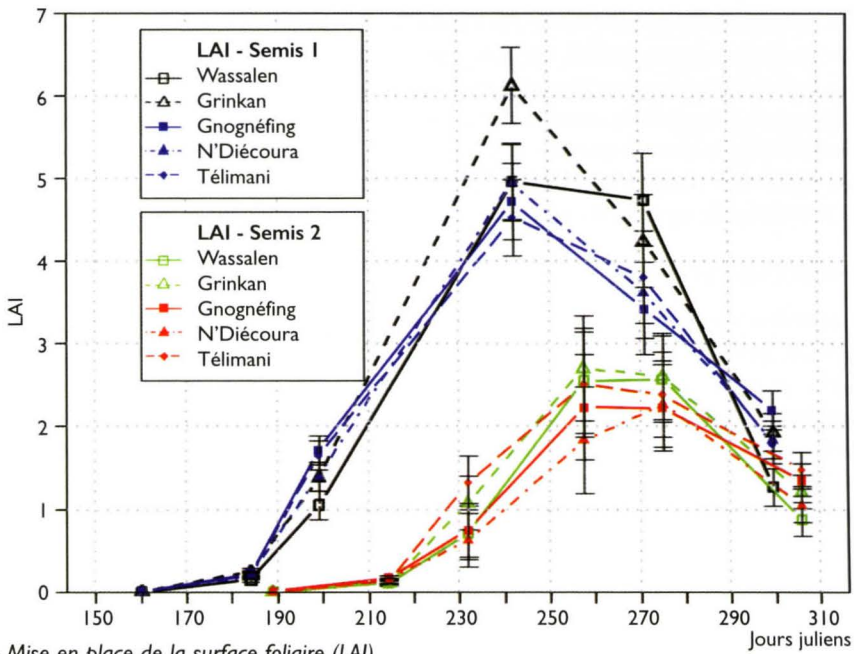
L'analyse de la variance du regroupement des essais montre que l'effet de l'année et les interactions entre les facteurs ne sont pas significatifs pour les productions de tiges et de feuilles. Ce résultat autorise la comparaison des effets moyens des variétés et de la date de semis (tabl. 1). Au niveau de l'analyse de variance, l'effet de la date de semis sur la production de feuilles est hautement significatif. La biomasse des feuilles passe de 2 794 kg/ha au premier semis à 1 494 kg/ha au second semis. En revanche, l'effet variétal sur la biomasse feuille n'est pas significatif. Il en ressort que toutes les variétés, qu'elles soient améliorées ou locales, développent des surfaces foliaires comparables.

Tableau 1.
Principaux résultats de production de biomasse végétative.
Comparaison des moyennes obtenues sur les deux années pour les 5 variétés
et les deux dates de semis.

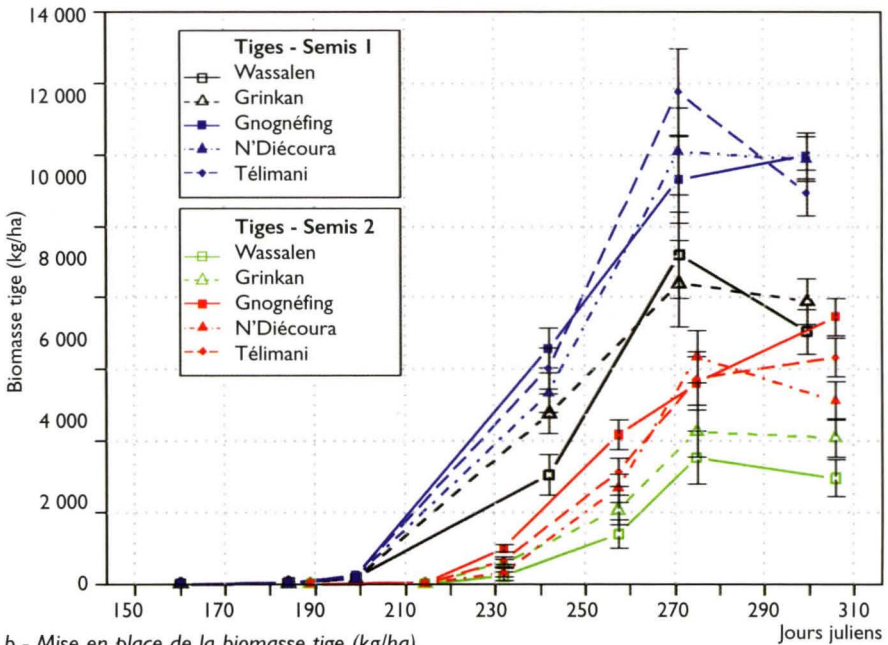
	Biomasse tige à maturité (kg/ha)				Biomasse feuille maximale (kg/ha)			
	Semis 1	Semis 2	moy.	HS	Semis 1	Semis 2	moy.	NS
Wassalen	7 050	2 959	5 004	b	2 939	1 453	2 196	a
Grinkan	7 892	4 080	5 986	b	3 380	1 520	2 450	a
N'Diéoura	11 882	5 128	8 505	a	2 565	1 380	1 972	a
Télimani	10 944	7 569	9 256	a	2 584	1 443	2 014	a
Gnognéning	11 977	7 465	9 721	a	2 501	1 473	1 987	a
Moy.	9 949	5 440	HS		2 794	1 454	HS	
	a	b			a	b		

Les moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes par le test de la PPDS.
Matière sèche tige : effet des variétés et de la date de semis hautement significatifs (P < 0.01).
Matière sèche feuille : effet date de semis hautement significatif.
L'effet de l'année et les interactions ne sont pas significatifs (P > 0.05).

L'évolution de la surface foliaire au cours du temps suit une courbe en cloche (fig. 3 a). Au premier semis, le LAI augmente jusqu'à un maximum d'environ 5 avant la floraison, puis diminue régulièrement jusqu'à la récolte car la sénescence des feuilles âgées n'est plus compensée par l'apparition de nouvelles feuilles. La dynamique est semblable pour le second semis, mais le LAI maximum n'est que de 2,5. L'impact de la date de semis sur l'établissement de la surface foliaire et donc du potentiel de photosynthèse est particulièrement clair. Il n'y a pas de différences variétales sur le LAI maximum développé, mais une différence apparaît pour la mesure réalisée après la floraison. À ce stade, le LAI des variétés améliorées se maintient à un niveau significativement plus élevé (P = 0,0242) que celui des variétés locales, en raison probablement du retard de sénescence (caractère stay-green) recherché par les programmes de sélection.



a - Mise en place de la surface foliaire (LAI).



b - Mise en place de la biomasse tige (kg/ha).

Figure 3.

Dynamique de mise en place de la surface foliaire et de la biomasse des tiges.
Les traits verticaux représentent l'erreur standard de la moyenne sur trois répétitions.

L'évolution de la matière sèche des tiges (fig. 3 b) montre les effets propres à la date de semis et au type variétal. La plus grande biomasse est atteinte après la floraison. La variation de biomasse tige observée après floraison peut être attribuée à l'échantillonnage. Le retard de semis diminue la production de matière sèche tige, qui passe de 9 950 kg/ha pour le premier semis à 5 440 kg/ha au second semis. La production de tiges des variétés améliorées est plus faible, elles produisent en moyenne 5 500 kg/ha de tiges tandis que les variétés locales atteignent 9 160 kg/ha.

PRODUCTION DE GRAINS

La production de grains a varié suivant les années, les dates de semis et les variétés. Les attaques d'oiseaux avant la récolte expliquent une grande part de la variabilité de la production en grains. Le rendement maximum a été obtenu pour la variété améliorée Wassalen (3 500 kg/ha) et le rendement le plus faible pour la variété Gnognéfiing (1 124 kg/ha). Pour éliminer l'interaction semis x variété, l'analyse a été réalisée séparément pour chaque semis en considérant les effets des deux années comme des environnements différents. Au premier semis, la productivité des variétés améliorées (2 560 kg/ha) est significativement supérieure à celle des variétés locales (1 416 kg/ha). Au deuxième semis, l'effet variétal est significatif mais ne dépend pas du type de variété (améliorées ou locales).

Discussion

Adaptation au climat

Les premières études sur le sorgho en Afrique subsaharienne reconnaissaient le rôle incontournable du photopériodisme (CURTIS, 1968). Les grandes sécheresses des années 1970 et 1980 ont orienté les sélectionneurs vers le développement de variétés précoces pouvant boucler leurs cycles avec des saisons des pluies de durées réduites (DANCETTE, 1983). L'élimination de la sensibilité à la photopériode a été le principal moyen utilisé pour réduire la durée du cycle. Par la suite, la révolution verte, dont la précocité est un des paradigmes fondamentaux (BONNEUIL et THOMAS, 2009), a conforté les programmes de sélection dans le développement de variétés précoces.

La date de semis est certainement un des choix techniques qui impacte le plus la production de matière sèche, devant la fertilisation et le travail du sol. Les variétés précoces doivent souvent être semées en retard après le début de la saison agricole, ce qui entraîne une augmentation considérable du risque d'échec des cultures (ANDREWS, 1973). Le retard de semis provoque une réduction de moitié de la surface foliaire développée et une diminution de la biomasse des tiges pouvant dépasser 4 500 kg/ha, comme l'indiquent les résultats de cette étude. Les réductions de la durée du cycle, du nombre de feuilles et des entre-nœuds expliquent, en grande partie, la baisse de productivité des variétés avec le retard de semis. Toutefois, les semis tardifs

produisent des rendements faibles pour de nombreuses autres raisons : dégâts des parasites, lessivage des éléments azotés et minéraux, faible quantité de rayonnement, refroidissement du sol, inondations, concurrence des mauvaises herbes et agressivité des pluies (SISSOKO *et al.*, 2018). Cette multiplicité des causes biotiques et abiotiques ne facilite pas la modélisation de l'effet de la date de semis sur la production de grains. C'est pourquoi la comparaison entre la fin de la saison des pluies et la date de floraison reste la meilleure évaluation synthétique de l'adaptation variétale (COCHEMÉ et FRANQUIN, 1967 ; SOUMARÉ *et al.*, 2008).

Même si un semis précoce est souhaité par les paysans, l'étalement des semis est une caractéristique de l'agriculture soudano-sahélienne. Les champs peuvent rarement être semés simultanément, des précipitations irrégulières au début de la saison entraînent des vagues successives de semis. Les contraintes de l'exploitation, le manque de main-d'œuvre ou de matériel agricole obligent aussi les paysans à échelonner les semis. Les modèles de développement sont des outils nécessaires à la conception d'idéotypes performants et adaptés. La démarche proposée permet de projeter simplement dans le temps et dans l'espace les conséquences d'un choix variétal. Pour systématiser cette approche au sein des programmes d'amélioration, il faudra développer des méthodes de mesure du photopériodisme sur de grandes populations et disposer d'outils informatiques simples pour coupler les modèles de développement aux bases de données météorologiques afin de fournir une représentation cartographique synthétique.

Intensification durable

On a longtemps pensé qu'il ne serait pas possible de réunir la sensibilité à la photopériode des variétés locales et la productivité des variétés modernes (HAUSSMANN *et al.*, 2012). Les résultats probants obtenus dans le développement d'hybrides (RATTUNDE *et al.*, 2013) ou par sélection assistée par les marqueurs moléculaires (SISSOKO *et al.*, 2018) montrent que le photopériodisme n'est pas un obstacle au développement de variétés productives. Toutefois, la réponse à l'intensification des variétés améliorées reste décevante (CLERGET, 2004), leurs rendements dépassent rarement 4 t/ha, même en agriculture intensive. Ces performances sont trop faibles pour que le sorgho devienne crédible face au maïs dans un système de culture intensifié. L'augmentation récente des besoins fourragers liée au développement d'un système d'élevage intensif a orienté les programmes d'amélioration vers le développement de sorghos à double usage (grain et fourrage). En valorisant économiquement la paille, il devient possible de contourner, en partie, la limite de productivité en grains et d'augmenter le revenu des cultivateurs de sorgho.

Pour une même surface foliaire, les variétés locales produisent jusqu'à 5 000 kg/ha de matière sèche de plus que les variétés modernes. Le matériel amélioré possède donc un potentiel de photosynthèse sous-utilisé (CLERGET, 2004). Pour prendre en compte ce déficit de photosynthèse, le modèle Samara ajuste la croissance en fonction de l'offre et de la demande (AKINSEYE *et al.*, 2017). Autrement dit, le modèle considère que la réduction du puits végétatif que constitue la tige entraîne une diminution de la photosynthèse, car il n'y a plus de débouchés pour les assimilats. Cet ajustement

du modèle reflète la réalité, mais il faut garder à l'esprit que la baisse de l'efficacité de la photosynthèse n'est pas la cause de la diminution de biomasse produite, mais la conséquence de la réduction de la taille des entre-nœuds. Ce déficit de photosynthèse est surtout le symptôme d'un déséquilibre dans la mise en place de la biomasse aérienne des variétés améliorées.

Pour valoriser pleinement le potentiel de photosynthèse du couvert végétal des sorghos photopériodiques, il faudrait donc canaliser l'excès de source de photosynthétats vers de nouveaux puits reproducteurs et végétatifs. Plusieurs voies de recherche peuvent être explorées pour atteindre cet objectif.

Des rendements élevés peuvent résulter de l'augmentation des densités de semis mais, jusqu'à présent, les résultats ont été décevants en raison de l'encombrement important du feuillage des variétés photopériodiques (SAPIN, 1983). Pour améliorer la tolérance aux fortes densités, à l'instar de ce qui a été fait pour le maïs depuis 1945 (LEE et TOLLENAAR, 2007), on pourrait introduire des essais sous stress de peuplement (fortes densités et semis précoces) dans le processus de sélection.

L'augmentation de la taille des tiges des nouvelles variétés permet d'augmenter la biomasse produite par le couvert végétal. La taille des tiges est aussi un facteur de rusticité, car les sorghos de grande taille sont plus compétitifs par rapport aux adventices (KOURESSY *et al.*, 1998 b), développent un enracinement plus dense (KOURESSY, 2007) et possèdent des réserves mobilisables en cas de stress (BLUM *et al.*, 1997). L'augmentation de la biomasse des tiges peut aussi améliorer la valeur double-usage si elle ne s'accompagne pas d'une baisse de la qualité fourragère en raison de plus fortes teneurs en lignines. Cette solution a déjà été mise en œuvre avec succès, puisque plusieurs hybrides diffusés au Mali sont de grande taille (KANTE *et al.*, 2017).

Plus simplement, une alternative consisterait à utiliser l'aptitude au tallage déjà présente chez de nombreux génotypes traditionnels, sauvages ou fourragers. Pour certaines variétés de sorgho, la contribution des talles au rendement grain total peut atteindre 78 % (LAFARGE *et al.*, 2002). Ce caractère est connu pour compenser naturellement d'éventuels déficits de peuplement mais il pourrait aussi compenser l'effet dépressif des semis tardifs. L'utilisation de l'aptitude au tallage interpelle les programmes de sélection du sorgho car, hormis pour le développement de sorghos purement fourragers, ce caractère a souvent été contre-sélectionné au profit de l'amélioration de l'indice de récolte.

Conclusion

En Afrique subsaharienne, l'augmentation rapide de la population et la saturation progressive des zones rurales forcent les paysans à intensifier la production agricole. L'augmentation de la productivité et de la valeur double-usage doit permettre au sorgho de trouver sa place dans les systèmes de cultures en voie d'intensification.

Les modèles seront des outils précieux pour orchestrer une démarche transdisciplinaire et faciliter les échanges entre physiologistes, généticiens et agronomes de façon à concevoir de nouveaux types variétaux performants et adaptés.

Les conditions nécessaires pour l'adaptation aux climats spécifiques de l'Afrique subsaharienne sont maintenant maîtrisées. Les modèles de développement permettent de projeter dans le temps et dans l'espace les conséquences d'un choix variétal pour concevoir des idéotypes prenant en compte la variabilité du climat ou les scénarios de changement climatique.

L'utilisation des modèles de croissance a permis de diagnostiquer le déséquilibre source/puits des variétés améliorées, qui possèdent un potentiel de photosynthèse sous-utilisé. La réduction de la taille des tiges des variétés améliorées n'a pas été compensée par une augmentation suffisante des densités de peuplement. Il faudrait parvenir à canaliser l'excès de source vers de nouveaux puits végétatifs et reproducteurs. Pour atteindre cet objectif, la modification de certains paradigmes issus de la révolution verte sera nécessaire : la rusticité des sorghos africains dépend surtout du photopériodisme, du tallage et de la haute taille des tiges, des caractères souvent négligés mais compatibles avec le développement de variétés performantes.

Ce travail constitue une première étape vers la sélection de variétés résilientes au changement climatique et adaptées à une intensification durable. Ces deux concepts sont étroitement liés, car l'amélioration de la gestion des risques climatiques fournira les bases nécessaires à une intensification durable.

Références

- ABDULAI A. L., KOURESSY M., VAKSMANN M., ASCH F., GIESE M., HOLGER B., 2012**
Latitude and date of sowing influences phenology of photoperiod-sensitive sorghums. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 198 (5) : 340-348.
- AKINSEYE F. M., ADAM M., AGELE S.O., HOFFMANN M. P., TRAORE P. C. S., WHITBREAD A. M., 2017**
Assessing crop model improvements through comparison of sorghum (sorghum bicolor L. moench) simulation models: A case study of West African varieties. *Field Crops Research*, 201 : 19-31.
- ANDREWS D. J., 1973**
Effects of date of sowing on photosensitive Nigerian Sorghums. *Exp. Agric.*, 9 : 337-346.
- BLUM A., GOLAN G., MAYER J., SINMENA B., 1997**
The effect of dwarfing genes on sorghum grain filling from remobilized stem reserves, under stress. *Field Crops Research*, 52 (1-2) : 43-54.
- BONNEUIL C., THOMAS F., 2009**
Gènes, pouvoirs et profits. FPH/Quae, 620 p.
- CLERGET B., 2004**
Le rôle du photopériodisme dans l'élaboration du rendement de trois variétés de sorgho cultivées en Afrique de l'Ouest. Thèse de doctorat Thesis, INA-PG, Paris, 103 p.

**CLERGET B., RATTUNDE H. F. W.,
DAGNOKO S., CHANTEREAU J., 2007**

An easy way to assess photoperiod sensitivity in sorghum: Relationships of the vegetative-phase duration and photoperiod sensitivity. *SAT eJournal*, 4 p.

COCHEMÉ J., FRANQUIN P., 1967

A study of the agroclimatology of the semi-arid area south of the Sahara in West Africa. FAO/UNESCO, 325 p.

CURTIS D. L., 1968

The relation between yield and date of heading in Nigerian sorghums. *Expl. Agric.*, 4 : 93-101.

DANCETTE C., 1983

Besoins en eau du mil au Sénégal. *Adaptation en zone semi-aride tropicale.* *Agronomie Tropicale*, 38 (4) : 267-280.

**DINGKUHN M., KOURESSY M.,
VAKSMANN M., CLERGET B.,
CHANTEREAU J., 2017**

A model of sorghum photoperiodism using the concept of threshold-lowering during prolonged appetence. *European Journal of Agronomy*, 28 (2) : 74-89.

**DINGKUHN M., PASCO R.,
PASUQUIN J. M., DAMO J., SOULIÉ J.-C.,
RABOIN L.-M., DUSSERRE J., SOW A.,
MANNEH B., SHRESTHA S., BALDE A.,
KRETZSCHMAR T., 2017**

Crop-model assisted phenomics and genome-wide association study for climate adaptation of indica rice. 1. Phenology. *Journal of Experimental Botany*, 68 (15) : 4369-4388.

**FOLLIARD A., TRAORE P. C. S.,
VAKSMANN M., KOURESSY M., 2004**

Modeling of sorghum response to photoperiod: a threshold-hyperbolic approach. *Field Crops Research*, 89 (1) : 59-70.

GOMEZ K. A., GOMEZ A. A., 1984

Statistical Procedures for Agricultural Research. New York, John Wiley & Sons, 2nd edition, 680 p.

HAUSSMANN B. I. G.,

**FRED RATTUNDE H.,
WELTZIEN-RATTUNDE E.,
TRAORÉ P. S. C., VOM BROCKE K.,
PARZIES H.K., 2012**

Breeding strategies for adaptation of pearl millet and sorghum to climate variability and change in West Africa. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 198 (5) : 327-339.

KANTE M., RATTUNDE H. F. W.,

**LEISER W. L., NEBIÉ B.,
DIALLO B., DIALLO A.,
TOURÉ A. O., WELTZIEN E.,
HAUSSMANN B. I. G., 2017**

Can Tall Guinea-Race Sorghum Hybrids Deliver Yield Advantage to Smallholder Farmers in West and Central Africa? *Crop Science*, 57 (2) : 833-842.

KOURESSY M., 2007

Adaptation agro-écologique et potentialités des sorghos photopériodiques à paille courte au Mali. Université Montpellier II, 161 p.

KOURESSY M.,

**NIANGADO O., DEMBÉLÉ T.,
VAKSMANN M., TROUCHE G.,
REYNIERS F.-N., 1998 a**

« La sélection de sorghos photopériodiques ». In Bacci L., Reyniers F.-N. (éd.) : *Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride*, Florence, Italie, Cirad : 247-262.

KOURESSY M., NIANGADO O.,

VAKSMANN M., REYNIERS F. N., 1998 b

« Étude de la variabilité phénologique des mils du Mali et de son utilisation pour l'amélioration variétale ». In Bacci L., Reyniers F.-N. (éd.) : *Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride*, Florence, Italie, Cirad : 59-75.

KOURESSY M., DINGKUHN M.,

VAKSMANN M., HEINEMANN A. B., 2008 a

Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148 (3) : 357-371.

- KOURESSY M., TRAORÉ S. B., VAKSMANN M., GRUM M., MAIKANO I., SOUMARÉ M., TRAORÉ P. S., BAZILE D., DINGKUHN M., SIDIBÉ A., 2008 b**
Adaptation des sorghos du Mali à la variabilité climatique.
Cahiers Agricultures, 17 (2) : 95-100.
- KOURESSY M., SULTAN B., VAKSMANN M., BELIÈRES J.-F., CLAESSENS L., DINGKUHN M., TÉMÉ N., 2019**
Climate Change and Cereal Production Evolution Trend in the Sahel: Case Study in Mali from 1951 to 2010.
Sustainable Agriculture Research, 8 (2) : 68-89.
- LAFARGE T. A., BROAD I. J., HAMMER G. L., 2002**
Tillering in grain sorghum over a wide range of population densities: Identification of a common hierarchy for tiller emergence, leaf area development and fertility.
Ann. Bot., 90 (1) : 87-98.
- LE BARBÉ L., LEBEL T., 1997**
Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990.
Journal of Hydrology, 188-189 : 43-73.
- LEE E. A., TOLLENAAR M., 2007**
Physiological Basis of Successful Breeding Strategies for Maize Grain Yield.
Crop Sci., 47 (Supplement_3) : S-202-215.
- LODOUN T., GIANNINI A., TRAORÉ P. S., SOMÉ L., SANON M., VAKSMANN M., RASOLODIMBY J. M., 2013**
Changes in seasonal descriptors of precipitation in Burkina Faso associated with late 20th century drought and recovery in West Africa.
Environmental Development, 5 : 96-108.
- OLSON S. N., RITTER K., ROONEY W., KEMANIAN A., MCCARL B. A., ZHANG Y., HALL S., PACKER D., MULLET J., 2012**
High biomass yield energy sorghum: developing a genetic model for C4 grass bioenergy crops.
Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 6 (6) : 640-655.
- RATTUNDE H. F. W., WELTZIEN E., DIALLO B., DIALLO A.G., SIDIBE M., TOURÉ A. O., RATHORE A., DAS R. R., LEISER W. L., TOURÉ A., 2013**
Yield of Photoperiod-sensitive Sorghum Hybrids Based on Guinea-race Germplasm under Farmers' Field Conditions in Mali.
Crop Sci., 53 (6) : 2454-2461.
- SAPIN P., 1983**
Le sorgho et son amélioration.
CNEARC/IRAT, 89 p.
- SISSOKO S., TÉKÉTÉ M. L., KOURESSY M., THERA K., DEMBÉLÉ Y., DOUMBIA M., SISSOKO A., SANOGO S., DIARRA Y., SAMAKÉ M., RAMI J. F., DIALLO A.G., VAKSMANN M., NIANGADO O., TÉMÉ N., 2018**
Combined agronomic and climatic approaches for sorghum adaptation in Mali.
African Journal of Agricultural Research, 13 (35) : 1816-1827.
- SOUMARÉ M., KOURESSY M., VAKSMANN M., MAIKANO I., BAZILE D., TRAORÉ P. S., TRAORÉ S., DINGKUHN M., TOURÉ A., VOM BROCKE K., SOMÉ L., BARRO KONDOMBO C. P., 2008**
Prévision de l'aire de diffusion des sorghos photopériodiques en Afrique de l'Ouest.
Cahiers Agricultures, 17 (2) : 160-164.
- THORNTON P. K., GERBER P. J., 2010**
Climate change and the growth of the livestock sector in developing countries.
Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 15 (2) : 169-184.
- TRAORÉ S. B., REYNIERS F.-N., VAKSMANN M., KONÉ B., SIDIBÉ A., YOROTÉ A., YATTARA K., KOURESSY M., 2000**
Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorghos du Mali.
Sécheresse, 11 (4) : 227-237.
- TRAORÉ P. C. S., KOURESSY M., VAKSMANN M., TABO R., MAIKANO I., TRAORÉ S., COOPER P., 2007**
« Climate Prediction and Agriculture: What Is Different about Sudano-Sahelian West Africa? » In Sivakumar M. V. K., Hansen J. (Eds) : *Climate Prediction and Agriculture*, Springer, Berlin-Heidelberg : 189-203.

**VAKSMANN M., KOURESSY M.,
CHANTEREAU J., BAZILE D., SAGNARD F.,
TOURÉ A., SANOGO O., DIAWARA G.,
DANTÉ A., 2008**

Utilisation de la diversité génétique
des sorghos locaux du Mali.

Cahiers Agricultures, 17 (2) : 140-145.

**VAN ITTERSUM M. K., VAN BUSSEL L. G. J.,
WOLF, J., GRASSINI, P., VAN WART, J.,
GUILPART, N., CLAESSENS L., DE GROOT H.,
WIEBE K., MASON-D'CROZ D., YANG H.,
BOOGAARD H., VAN OORT P.A. J.,
VAN LOON M. P., SAITO K., ADIMO O.,
ADJEI-NSIAH S., AGALI A., BALA A.,
CHIKOWO R., KAIZZI K., KOURESSY M.,
MAKOI J. H. J. R., OUATTARA K.,
TESFAYE K., CASSMAN K. G., 2016**

Can sub-Saharan Africa feed itself?

*Proceedings of the National Academy
of Sciences*, 113 (52) : 14964-14969.

**VISCHEL T., LEBEL T.,
PANTHOU G., QUANTIN G., ROSSI A.,
MARTINET M., 2015**

« Le retour d'une période humide au Sahel ?
Observations et perspectives ».

In Sultan B., Lalou R., Amadou S. M.,
Oumarou A., Soumaré M. A. (éd.) :

*Les sociétés rurales face
aux changements climatiques
et environnementaux*

en Afrique de l'Ouest,

Marseille, IRD Éditions : 43-60.

**VOM BROCKE K., TROUCHE G.,
ZONGO S., ABDRAMANE B.,
BARRO-KONDOMBO C.P., WELTZIEN E.,
CHANTEREAU J., 2008**

Création et amélioration de populations
de sorgho à base large avec les agriculteurs
au Burkina Faso.

Cahiers Agricultures, 17 (2) : 146-153.